

氏 名	中村 悟史
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博甲第 1071 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 21 年 3 月 23 日
学 位 授 与 の 要 件	課程博士(学位規則第 4 条第 1 項)
学 位 授 与 の 題 目	ExtraU(1) 超対称模型における暗黒物質とその起源
論文審査委員 (主査)	末松 大二郎 (理工研究域・教授)
論文審査委員 (副査)	青木 健一 (理工研究域・教授), 久保 治輔 (理工研究域・教授), 鈴木 恒雄 (総合メディア基盤センター・教授), 村上 敏夫 (理工研究域・教授)

In the thesis we discuss phenomenology of extra U(1) supersymmetric models. These models are "MSSM + extra U(1) gauge symmetry + singlet chiral superfield" If U(1)' models are right then we can expect that extra neutral gauge boson will be discovered in LHC. So we study realistic U(1) models now. In particular, we study dark matter problem in these models. Because, in U(1) models Neutralino has two additional component. They are additional a gaugino and a additional higgsino (it's named singlino).

First, we estimated allowed region for CDM relic abundance of WMAP observation. We show that CDM is singlino dominated lightest neutralino in the region. And if the model is realize, we expect that extra neutral gauge boson  $Z'$  will be discovered by LHC experiments. Finally, we show that  $\mu$ /B-problem can be solved in a certain parameter region.

2008 年 9 月 10 日、LHC 加速器のビームラインが始動した。残念ながらトラブルにより 10 日ほどでこのビームは止められることになるが、LHC 実験チームは今年度中の first collision を目指している。この LHC 実験は最大 14TeV の中心エネルギーで陽子同士を衝突させ TeV スケールの物理を探ることを目的としており、標準模型の最後の粒子であるヒッグス粒子の発見と、標準模型を超える物理で予言される種々の新粒子の発見が期待されている。LHC 実験が始まり、これから数年の後に数々の実験データが出される今、より現実的な、標準模型を超える模型やパラメータ領域の議論をすることは極めて重要である。

一方、理論的には標準模型を超える種々の模型が提案されているが、その中で最も期待されている枠組みの 1 つに、模型のフェルミオンとボゾンの間に対称性を課す超対称性理論がある。この超対称性の導入により、階層性問題や暗黒物質問題など標準模型に残された問題のいくつかを解決することができる。一方で、標準模型を最小に超対称化した模型である最小超対称標準模型 (MSSM) にもいくつかの問題点が残されている。その 1 つが  $\mu$  problem と呼ばれる階層性問題の一種である。この問題を解決するために Singlet を新たに加えるタイプの MSSM の拡張がいくつか考案されている。

このタイプの拡張 MSSM は、MSSM に加える Singlet Chiral Super field と対称性によりカテゴリーライズされるが、本論文では拡張 MSSM の中でも新たに U(1) ゲージ対称性を課すタイプの拡張に注目する。この拡張の特長は比較的シンプルな拡張によって、離散的対称性や大域的対称性で現れるような問題点をクリアしつつ、新たに現れる中性ゲージ粒子  $Z'$  が高い予言能力を持つ点にある。さらに、この拡張によりヒッグス粒子の質量に対する実験的制限をはじめ、現象論的に興味深い性質を持つ。特に拡張された中性超対称フェルミオンの影響で、暗黒物質の性質が大きく変更を受ける。この extra U(1) 超対称模型の暗黒物質とその周辺の現象論的性質について詳しく調べることが、本論文の目的の 1 つである。

超対称模型の構築でさらに重要になるのはその破れのメカニズムである。超対称性は必然的に低エネルギーで破れていなければならないが、同じセクターの中で自発的に破れると sum

roleによりフェルミオンとスカラー粒子の質量が同程度でなければならぬため、矛盾が生じる。そのため非常に高エネルギーな隠れたセクターでの破れを低エネルギーの観測可能なセクターへ伝えるメカニズムを考えなければならない。この時ポイントになるのは標準模型ではGlashow-Iliopoulos-Maiani(GIM)メカニズムによってうまく抑えられていたFCNCの寄与をいかに抑制するかという点である。そのためにはフレーバーによらない相互作用により超対称性の破れを伝えなければならないが、その代表的な伝達メカニズムとして、重力を媒介するGravity Mediationとゲージ相互作用により媒介するGauge Mediationがある。後者のGauge MediationはGravity Mediationに比べて低エネルギーで破れが伝わるためより予言能力が高い模型であるが、 $\mu$  problemの解決に対しては親和性が悪いことが知られていた。そこで本論文ではGauge Mediationを拡張し、それによる $\mu$  problemの改善と、暗黒物質残存量等の低エネルギーでの物理量との関係について調べる。

以上の研究背景を踏まえ本論文では、Extra  $U(1)$  超対称模型の枠組みの中で、種々の実験的制限による許容パラメータ領域を調べ、その中でLHC実験等の将来実験で期待される超対称模型の1つの可能性としていくつかの予言を得た。まずWMAPの観測した暗黒物質量を満たすようなパラメータ領域fig 1では、暗黒物質である最も軽いNeutralinoの成分が9割以上をSinglinoが占めるという結果を得た。また、そのような状況では $Z'$ を交換するような対消滅過程が宇宙初期に最も効いているという、この模型に特異な結果を得た。また $Z'$ の二重荷電レプトンへの崩壊比や、Higgs質量の実験的下限と $\mu$ 問題の解決という要請により、fig 1のように $Z'$ 質量に対して極めて厳しい上限と下限を与えることができ、この模型が正しいとしたときにLHC実験で検証可能であるという予言を得ることができた。さらに暗黒物質の直接検出実験による模型への制限を計算し、現在の制限ではこれをクリアしていることを示した上で、将来実験でもし暗黒物質を直接検出実験で捉えることができれば、模型の各粒子に割り当てられるExtra  $U(1)$  chargeを決めるパラメータをも決定できることをfig 2のように示した。

最後に、これらのことを実現できるような超対称性の破れの起源を調べるにあたって、いくつかの予備計算を行った。まず既にC.E.M.Wagnerによって指摘されていた、NMSSMの枠組みの中でGauge Mediationを拡張することにより $\mu$ 問題が改善されることを、簡便な方法ではあるがfig 3のように独立の計算で改めて示すことができた。また、拡張の度合いを決めるパラメータ $\eta$ が、 $\mu$ 問題を解決し得るポテンシャルを得るための超対称性の破れのスケールと密接に関連していることを示した。

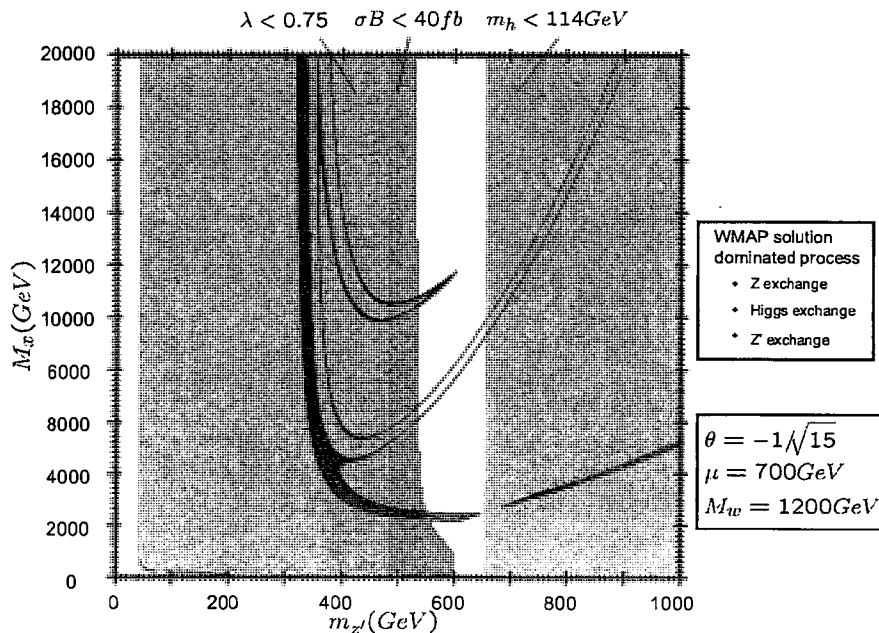


fig 1: WMAP が観測した暗黒物質残存量の許容領域

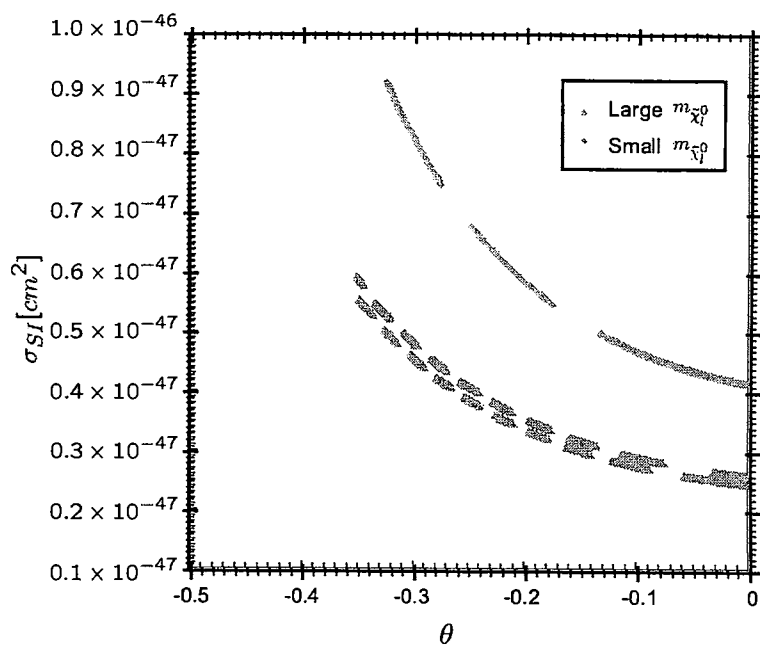


fig 2: 弾性散乱断面積の  $\theta$  依存性 -  $\lambda = 0.56$

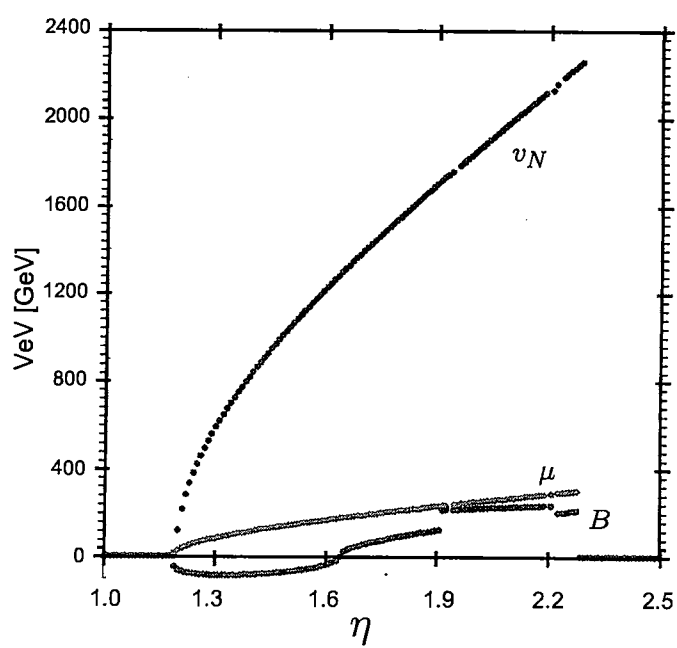


fig 3:  $\mu, B$  パラメータの  $\eta$  依存性

## 学位論文審査結果の要旨

本学位論文について、各委員による事前審査の後、平成 21 年 2 月 6 日に口頭発表を実施し、引続き行われた審査会における協議の結果、以下のように判定した。

素粒子標準模型は多くの実験的成功を収めたが、宇宙観測による暗黒物質の存在の発見の結果、その拡張を迫られている。標準模型は理論的には不満足なものと考えられ、超対称性による拡張が研究されて来た。超対称性による拡張は暗黒物質の候補となる粒子を自然に導入し有望である。超対称模型の研究においては、重力相互作用により媒介される超対称性の破れを持つ最小超対称標準模型が主たる研究対象となっている。本論文では、この枠組の外にある新たな可能性として、最小超対称標準模型を  $U(1)$  ゲージ対称性で拡張した  $Z'$  模型、及び、ゲージ相互作用によって媒介される超対称性の破れを持つ模型を取り上げ、その特徴的性質を検討し、LHC 等における実験的な検証可能性を調べている。

本論文で得られた主たる成果は以下の通りである。(1)暗黒物質の候補となる粒子の存在を  $Z'$  模型において示し、その性質を明らかにした。(2)この暗黒物質の残存量を評価し、ヒッグス粒子やニュートラリーノ、 $Z'$  に要求される質量を決め、LHC における  $Z'$  発見の可能性を指摘した。(3)暗黒物質の直接検出について解析し、模型に対する制限を明らかにした。(4)ゲージ相互作用で超対称性の破れを媒介する模型を拡張し、 $\mu/B$  問題が解決され得ることを示した。これらは、超対称模型の今後の実験的検証に有用な成果と言える。

以上の理由により、本論文は博士論文に値するものと判定する。